

## **Transdisziplinäre Energieforschung und Energiewende – Der Beitrag des EFZN\***

H.-P. BECK, A. BECKER, M. JUHRS UND S. NAKHAIE

Energieforschungszentrum Niedersachsen  
Am Stollen 19A, D-38640 Goslar

### **1. Herausforderungen der modernen Energielandschaft**

Die Bereitstellung und Nutzung von Energie ist seit jeher ein zentraler Bestandteil der menschlichen Zivilisation. Besonders die heutige Gesellschaft ist auf eine sichere und nachhaltige Versorgung angewiesen, um den in den letzten Jahrhunderten gewonnenen Lebensstandart zu halten und weiter auszubauen. Dennoch wirft dieses Grundbedürfnis in unserer Zeit verschiedene, bisher nicht gekannte Probleme auf.

Zunächst ist dabei die zunehmende Knappheit der Energieressourcen zu nennen, die einem steigenden Bedarf durch die wachsende Weltbevölkerung und fortschreitende technologische Entwicklung gegenüber steht. Um dieses Rohstoffe zu gewinnen, müssen immer anspruchsvollere und schwer zu erschließende Quellen erschlossen werden. Die Mehrheit des heutigen Energieversorgungssektors ist auf die Nutzung endlicher fossiler Rohstoffe ausgelegt. Im Jahr 2011 wurden über 80% des bereits enormen weltweiten Energiebedarfs damit gedeckt<sup>1</sup>. In Deutschland wird diese drohende Versorgungsknappheit durch den Atomausstieg zusätzlich beschleunigt.

Dieses Ressourcenproblem wird verschärft durch ein Effizienzproblem. Angefangen bei geringen Wirkungsgraden von Kraftwerken über Transportverluste bis hin zu nicht notwendiger Verwendung geht Energie an vielen Stellen ungenutzt verloren. Beispielsweise betrug der durchschnittliche Wirkungsgrad von fossil befeuerten Kraftwerken in Deutschland im Jahr 2011 gerade einmal 40%<sup>2</sup>. Ein Großteil der eingesetzten Primärenergie geht in Form von Abwärme für die Nutzung verloren.

---

\* Der Vortrag wurde am 11.07.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

<sup>1</sup> International Energy Agency: Key World Energy Statistics. Paris 2013.

<sup>2</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. Berlin 2013.

Eine weitere Herausforderung ist die Senkenproblematik. Bei der Nutzung fossiler Energieträger wird das darin gespeicherte  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre frei gesetzt. Durch diese Anreicherung befürchten Klimatologen dramatische Veränderungen. Eine nachhaltige Nutzung dieser Rohstoffe kann also nur erfolgen, wenn gleichzeitig ausreichend Kohlenstoffsinken, beispielsweise durch Aufforstung geschaffen werden. Aber auch eine Weiterverwendung oder Lagerung von Reststoffen kann Nachhaltigkeit gewährleisten. Ähnlich verhält es sich mit sonstigen Abfallstoffen der Energiegewinnung. Gerade in Deutschland ist der umstrittene Umgang mit radioaktiven Abfällen zu nennen. Auch hier scheint es bisher kein nachhaltiges Konzept zu geben.

Das größte Problem bei der Versorgung der Gesellschaft mit Energie ist aber das Bewusstseinsproblem. Ein Großteil der Menschen kennt weder die komplexen Schritte und den damit verbundenen Aufwand, um ihren täglichen Bedarf mit Energie zu decken, noch sind sie sich bewusst, dass die Versorgung mit Energie immer aufwendiger und arbeitsintensiver wird. Dabei könnten geringe Anpassungen im persönlichen Lebensumfeld insgesamt zu einer deutlichen Entlastung der Energielandschaft führen. Die hohe Netzsicherheit in Deutschland und die bisher gute Versorgungslage scheinen jedoch diese Probleme aus dem Leben der Menschen fern zu halten.

Es zeigt sich, dass die Versorgung mit Energie heute vor verschiedenen Herausforderungen steht, denen es zu begegnen gilt. Durch die von der Bundesregierung beschlossene Energiewende ist ein Weg zur Begegnung dieser Probleme politisch vorgezeichnet. Bis 2050 sollen dazu 80% des Bruttostromverbrauchs durch regenerativen Energieträger gedeckt<sup>2</sup> und gleichzeitig die Versorgungssicherheit und Qualität nicht gefährdet werden. Dadurch wird eine hohe Erwartungshaltung an die Wissenschaft generiert, da sie Antworten aufzeigen muss, um diesen Weg erschließen zu können. Wie können mehr regenerative Energieressourcen erschlossen werden? Wie können diese effizienter genutzt werden? Wie soll mit Rest- und Abfallstoffen aus der Energiegewinnung umgegangen werden? Und wie muss eine nachhaltige Energielandschaft gestaltet sein?

Um diese Fragen zu beantworten ist es notwendig, die komplexen Verknüpfungen in der Energielandschaft zu ergründen. Jedoch beschäftigen sich die klassischen wissenschaftlichen Disziplinen nur jeweils mit einzelnen Ausschnitten des Gesamtkomplexes. Es fehlt ein übergreifendes Fach der Energiewissenschaft, das diese Forschungen bündelt, koordiniert und somit ganzheitliche Antworten gibt.

Genau an diesem Punkt greift der neuartige Forschungsansatz des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) an. Grundlegender Gedanke ist, dass die Grenzen zwischen wissenschaftlichen Fächern aufgelöst, um zu verhindern, dass diese zu Erkenntnisgrenzen werden. Bereits erprobt und gängige Praxis ist dies bei Forschungsverbünden, die jedoch meist nur lose organisiert und auf Dauer einzelner Projekte gebildet werden. Die Langfristigkeit der Aufgabe er-

fordert jedoch eine dauerhafte Struktur. Zu diesem Zweck wurde das EFZN als ein Zentrum der Energieforschung gegründet.

## **2. Vorstellung der Struktur**

Auf Initiative der TU Clausthal wurde das EFZN 2008 als gemeinsame Forschungseinrichtung mit den Universitäten Braunschweig, Göttingen, Hannover und Oldenburg gegründet<sup>3</sup>. Es steht für die dauerhafte Zusammenführung lösungsrelevanter Fächerkompetenzen, um offenen Fragen zur Gestaltung der Energielandschaft zu begegnen. Zentraler Bestandteil ist dabei die starke disziplinäre Forschung an den Instituten der Mitgliedsuniversitäten. Sie sind als Pfeiler zu sehen, die das EFZN durch seine Transdisziplinarität als Brücke überspannt. Dies könnte die Grundlage sein, um aus den einzelnen energiebefassten Wissenschaften künftig eine eigene Disziplin „Energiewissenschaft“ zu schaffen, deren Wissensspektrum und Lösungskompetenz der heutigen Problemlage mehr entsprechen würde.

### **2.1. Der transdisziplinäre Forschungsansatz**

Der Ansatz der transdisziplinären Forschung des EFZN bedeutet den Brückenschlag zwischen den tradierten, mit der Energieforschung beschäftigten Wissenschaftsdisziplinen. Ingenieurs-, Wirtschafts-, Rechts-, Sozial- und Naturwissenschaften werden davon eingeschlossen. Sie bedeutet darüber hinaus die Auflösung der Grenzen zwischen theoretischer Forschung und praktischer Anwendung. Dazu kooperiert das EFZN immer wieder mit Partnern aus der Wirtschaft, um wissenschaftliche Erkenntnisse direkt umsetzen zu können. Transdisziplinarität ist nicht zuletzt die Schnittstelle zwischen wissenschaftlichen und gesellschaftspolitischen Fragestellungen, was beispielsweise bei den engen Verknüpfungen zwischen Energieversorgung und Umweltschutz deutlich wird.

Die Transdisziplinarität hebt die fachliche Begrenzung der Disziplinen an den Stellen dauerhaft auf, an denen auf Grund hoher Spezialisierung die problemlösende Kraft eingebüßt wurde. Der offene Dialog zwischen Vertretern verschiedener Fachdisziplinen auf Augenhöhe ist dabei eine grundlegende Voraussetzung. Ebenso ist es notwendig, dass Personen einbezogen werden, die einen kritischen Dialog führen können und über fundierte Kenntnisse in den beteiligten Disziplinen verfügen. Unter diesen Voraussetzungen geben, so ist dieser Forschungsansatz im Stande, gesellschaftliche Fragestellungen aufzugreifen und zu lösen, die von Einzeldisziplinen nicht erschließbar sind.

---

<sup>3</sup> Energie-Forschungszentrum Niedersachsen: Jahresbericht 2012/2013. Goslar 2013.

Transdisziplinarität unterscheidet sich von der Inter- und Multidisziplinarität durch den Grad der Integration verschiedener Disziplinen. Multidisziplinarität stellt dabei die geringsten Integrationsgrad dar. Hierbei werden Forschungsgegenstände zwar parallel in verschiedenen Disziplinen untersucht, es fehlt jedoch an einer fachübergreifenden Abstimmung einer Strategie und einer Methode. Bei der Interdisziplinarität dagegen, findet genau dieses statt. Trotz dieser Abstimmung bleiben aber die Einzeldisziplinen voneinander unabhängig. Erst die Transdisziplinarität überspannt die Fachgrenzen und lässt somit die gemeinsame fachunabhängige Bearbeitung des Forschungsgegenstandes zu.

Die größte Hürde transdisziplinärer Forschung sind die teilweise stark differenzierten Begriffswelten in den einzelnen Disziplinen, die den Dialog behindern. Fest geprägte Fachbegriffe können in einer anderen Disziplin stark unterschiedliche Assoziationen hervorrufen. Eines von vielen Beispielen ist das Wort Integration, welches in der Mathematik einen anderen Hintergrund hat als in den Sozialwissenschaften. Genau deshalb ist es notwendig aktiv am vielversprechenden Ansatz der Transdisziplinarität zu arbeiten. Das EFZN möchte die noch junge Forschung üben, pflegen und mithelfen, diese im Energiebereich zu etablieren. Ziel kann dabei die Schaffung neuer (Aus-)Bildungsgänge sein. Beispielsweise mit einem Abschluss Energiewissenschaft.

## 2.2. Aufbau

Unter dem Dach des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen kooperieren 80 Wissenschaftler aus den fünf beteiligten Niedersächsischen Universitäten. Die wissenschaftliche Aufgabe des EFZN ist es, die zunehmend komplexer werden den Fragen zur Energiegewinnung und -veredelung oder auch zur Entsorgung von Abfallprodukten der Energieerzeugung durch eine verstärkte und dauerhafte Zusammenarbeit verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen zu beantworten. Somit wird eine Fokussierung erforderlich, welche die gesamte Energiekette in den Blick nimmt und die gegenseitigen Abhängigkeiten disziplinübergreifend bei der Problemanalyse und -lösung einbezieht.

Um den transdisziplinären Forschungsansatz entlang der gesamten Energiekette erfolgreich in die Praxis umsetzen zu können, ist das EFZN aufbauorganisatorisch in insgesamt neun Forschungsbereiche gegliedert (siehe Abbildung 1). Aus diesen werden zur jeweiligen Fragestellung projektbezogene Arbeitsgruppen gebildet. Jeder Forschungsbereich wird fachlich von einer/einem ProfessorIn der EFZN-Universitäten geleitet. Die Arbeit in den Forschungsbereichen vor Ort in Goslar wird durch Projektentwickler organisiert und gestaltet. Bei diesen handelt es sich um Postdocs bzw. ausgewiesene Fachleute mit langjähriger Berufserfahrung aus den Bereichen der Ingenieur- und Naturwissenschaften, Informatik sowie der Gesellschafts- und Geisteswissenschaften. Die Verschränkung der beteiligten

Disziplinen und Wissenschaftler erfolgt unter anderem durch gemeinsame wöchentliche Arbeitssitzungen, in denen Forschungsvorhaben diskutiert, entwickelt und umgesetzt werden. Die Projektentwickler nehmen somit eine Schlüsselfunktion bei der täglichen wissenschaftlichen Arbeit des EFZN ein.

## 2.3. Forschungsbereiche

Der steigende Bedarf an Rohstoffen beeinflusst die zeitliche Reichweite der Nutzung natürlicher Ressourcen. Gleichzeitig besteht bei der Gewinnung dieser Rohstoffe die Notwendigkeit zu einer möglichst nachhaltigen Bewirtschaftung der natürlichen und endlichen Lagerstätten. Die Kosten für die Energiebereitstellung hängen in direkter Weise von technischen Innovationen zu weiteren Effizienzsteigerungen bei der Rohstoffgewinnung ab. Im Forschungsbereich *Energierohstoffe und -speicher* werden vor diesem Hintergrund folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Nachhaltige Energieversorgung: Um die negative ökologische Folgen und die Abhängigkeit von Importen mittel- bis langfristig reduzieren zu können, wird an einer grundlastfähigen und nachhaltigen Energieversorgung geforscht. Beispiel dafür ist die Tiefengeothermie.
- Optimierung bei der Rohstoffversorgung: Mittelfristig wird weltweit ein Großteil der Energie von verhältnismäßig großen zentralen Anlagen, auf Basis von fossilen Brennstoffen erbracht. Für diese Energierohstoffe bzw. für weitere mineralische Rohstoffe liegt der Schwerpunkt bei Effizienzsteigerungen unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten für Erkundung, Gewinnung und Aufbereitung aus primären und sekundären Quellen.
- Energiespeicherung: Um die fluktuierende Energiebereitstellung aus erneuerbaren Ressourcen zu verstetigen und einen zuverlässigen Netzbetrieb und die Systemsicherheit zu gewährleisten, besteht ein Bedarf an Energiespeichersystemen mit spezifischen Anforderungen an Leistung, Kapazität und Dynamik.

Der Forschungsbereich *Energiewandlung und Veredelung* umfasst die Prozesse der Energiewandlung bzw. der Bereitstellung von Endenergie. Die Veredelung der Energie ist geprägt von der Art der Bereitstellung, wie zum Beispiel der Direktvermarktung, Speicherung oder stofflichen Konversion. Bei den Forschungsarbeiten werden die elektrochemische, mechanische, thermische und stoffliche Wandlung und Speicherung, sowie die Kopplung von Prozessen und Komponenten betrachtet. Durch die Gesamtsystembetrachtung und die Integration neuer innovativer Prozesse in bestehende Systeme kann ein wesentlicher Beitrag zur Transformation des Energiesystems geliefert werden.

Zu den Themenfeldern, die den Schwerpunkt der Arbeiten im Forschungsbereich *Energiesysteme und Prozessenergie-technik* bilden, gehören zum einen Energiesysteme, darunter fallen Wandlung, Transport, Verteilung, Speicher, Nutzung

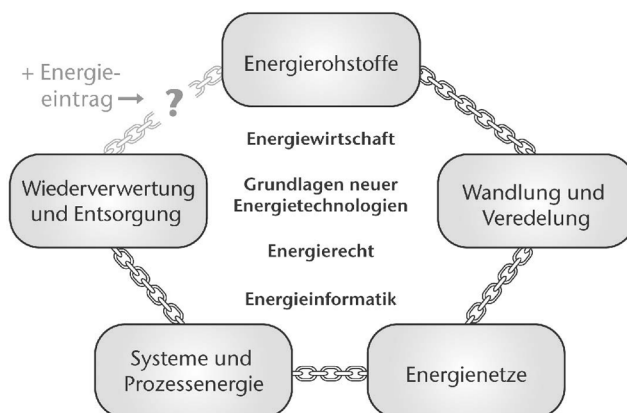


Abbildung 1.

und Management. Zum anderen beschäftigen sich die Wissenschaftler mit der Leistungsmechanik, einem interdisziplinären Gebiet der Ingenieurwissenschaften, sowie der Prozessenergie, deren Problematik im Bereich der Energieoptimierung und Energieeinsparung in der Industrie, in Kraftwerken sowie beim Endverbraucher liegt. Die industrielle Prozessenergie ist eine Querschnittstechnologie, die bei vielen Herstellungs- und Bearbeitungsprozessen aus technologischer und energetischer Sicht eine zentrale Bedeutung einnimmt.

Im Forschungsbereich *Energienetze* liegt der Fokus auf Systemen für den Energietransport und die Energieverteilung. Zu den Themenschwerpunkten gehören elektrische Übertragungs- und Verteilungsnetze, Gasnetze (einschließlich Druckluftnetze) sowie Wärme- und Kältenetze. Die Veränderung des Energie-Mixes bei der Stromerzeugung zugunsten der Erhöhung des regenerativen Anteils erfordert ebenso wie die dezentrale Nutzung der Abwärme von Kleinkraftwerken zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz einen Umbau des heutigen Transport- und Verteilungsnetzes für die elektrische Energie. Geothermie mit Wärmepumpen, Solarthermie mit Kollektoren in Verbindung mit thermischen Speichern werden künftig immer stärker in die Energiesystemtechnik einzubinden sein.

Eine effiziente Nutzbarmachung von Abfällen sowie die sichere und umweltverträgliche Entsorgung nicht wieder verwertbarer Abfälle gehören zu den Kernaufgaben der Rohstoffsicherung und des Umweltschutzes. Der Forschungsbereich „Wiederverwertung und Entsorgung“ stellt sich diesen Aufgaben und führt interdisziplinäre Forschungsarbeiten unter anderem zur Nutzbarmachung von Massenabfällen und zu Verwertungstechnologien für ausgediente Produkte und Einrichtungen (Recycling) und zur energetischen und thermischen Verwertung von Alternativbrennstoffen aus Abfällen durch.

Im Forschungsbereich *Energieinformatik* arbeiten die Wissenschaftler an geeigneten Ansätzen für die Gesamtsicht auf Erzeugung, Verbrauch und Speicherung in dynamischen und komplexen Wirkzusammenhängen. Sie befassen sich unter anderem mit Verbundbildungsmechanismen, Steuerungsalgorithmen und Automatisierungsstrategien. Für einen Wandel in der Energieversorgung müssen die konventionell zentral angelegten Kraftwerksleistungen durch ein Zusammenspiel regenerativer Energieanlagen in einem dezentralen Energiesystem substituiert werden. In intelligenten Energieversorgungsnetzen der Zukunft, den sogenannten „Smart Grids“, werden Versorgungsinfrastrukturen an dedizierten Stellen von Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen zu unterstützen sein, um eine rechtzeitige Organisation und Koordination sowie eine sofortige Interaktion aller Netznutzer zu ermöglichen.

Zur Bewertung und Ausgestaltung von energetischen Konzepten ist die Betrachtung von wirtschaftlichen Aspekten essentiell. Dies geschieht im Forschungsbereich *Energiewirtschaft*. Einerseits muss die Wirtschaftlichkeit von Produktionsverfahren, zum Beispiel zur Herstellung von Biokraftstoffen oder zur energetischen Nutzung von Biomasse, ermittelt werden. Andererseits stehen den wirtschaftlichen Kriterien wie Ertrag, Verkaufspreis oder Kosten des Anlagenbetriebs etliche ökologische und soziale Herausforderungen gegenüber, wie etwa CO<sub>2</sub>-Bilanz und Akzeptanz vor Ort, die ebenfalls zu berücksichtigen sind. Dazu bietet das EFZN unter anderem auch über die beteiligten Mitglieder an den jeweiligen Universitäten wichtige Expertise.

Der Forschungsbereich *Energierrecht* strebt an, Kompetenzen in den wesentlichen Bereichen des Energierechts vorzuhalten. Berücksichtigt werden insbesondere das Regulierungsrecht, das Recht des Netzausbaus und Rechtsfragen der nachhaltigen Energieversorgung. Die Arbeit der Wissenschaftler des Forschungsbereichs richtet sich zum einen auf die energierechtlichen Aspekte übergreifender energiebezogener Aufgabenstellungen entlang der gesamten Energiekette. Zum anderen strebt der Forschungsbereich die breitere juristische Bearbeitung dreier Themenschwerpunkte an: „Regulierungstiefe“, „Nachhaltige Energieversorgung und Markt“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen neuer Energie- und Klimaschutztechnologien“.

Die Arbeiten im Forschungsbereich *Grundlagen neuer Energietechnologien* konzentrieren sich zunächst schwerpunktmäßig auf die beiden Themengebiete „Energiewandlung mit neuen Materialien“ und „Sensorik zur optimierten Energieeffizienz“. Bei der Materialentwicklung stehen für Sensor- und Aktuatorapplikationen insbesondere Hochtemperaturmaterialien und für die Energiewandlung nanoskalige Materialien im Vordergrund künftiger Entwicklungen. Auf der Basis verbesserter und neuer Materialien sollen neue Funktionsprinzipien zielorientiert geschaffen und erprobt werden. Daneben spielen die Entwicklung neuer Konzepte zur Miniaturisierung von Sensoren und Sensorsystemen eine wesentliche Rolle.



### 3. Projektbeispiele transdisziplinärer Forschung

Basierend auf den Empfehlungen zu Schwerpunkten der niedersächsischen Energieforschung<sup>4</sup> haben EFZN-Vorstand und -Kuratorium insgesamt sieben Forschungsschwerpunkte beschlossen (siehe Abbildung 2). Es handelt sich dabei zunächst um die Themenfelder „Smart Grids“, „Bioenergie“, „Windenergie“ und „Gesellschaftswissenschaftliche Energieforschung“, welche vorrangig an den jeweiligen Standorten der EFZN-Mitgliedsuniversitäten weiterentwickelt werden. Die weiteren Schwerpunktthemen „Energiespeicher und -systeme“, „Tiefengeothermie“ und „Materialwissenschaftliche Energieforschung“ sind hingegen profilbildend für das EFZN am Standort Goslar.

Als Beispiele für die transdisziplinäre Forschung am EFZN sollen im Folgenden drei der 52 derzeit laufenden Vorhaben vorgestellt werden:

#### 3.1. Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit

- Stromautobahnen im Verbundnetz
- e-home Energieprojekt 2020
- Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit

Die Stabilität und Zuverlässigkeit der Stromversorgung ist gegenwärtig von der Dominanz zentraler und leistungsstarker Kraftwerke, einer großen Reservekapazität von schnell aktivierbaren Spitzenlastkraftwerken, den Eigenschaften elektromechanischer Synchronmaschinen und leistungsfähigen Transport- und Verteilnetzen geprägt. Außer wenigen, großen Pumpspeicherkraftwerken kommen so gut wie keine Energiespeichereinheiten in der Stromwirtschaft zum Einsatz. Die Struktur der Stromversorgung wird sich langfristig deutlich verändern. Im Speziellen ist die zunehmende dezentrale, kleinteilige und umrichterdominierte Einspeisung aus erneuerbaren, meist fluktuierenden Energiequellen bei gleichzeitiger Verdrängung konventioneller Großkraftwerke zu nennen. Die Konsequenzen dieses langfristigen Veränderungsprozesses im Hinblick auf die Sicherheit und Stabilität der Versorgung sind bereits kurzfristig relevant.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im September 2012 das EFZN beauftragt, im Rahmen einer Kurzstudie aufzuzeigen, welche Speichertechnologien verfügbar und geeignet sind, einen

---

<sup>4</sup> Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen: Energieforschung in Niedersachsen 3/2011. Hannover 2011.



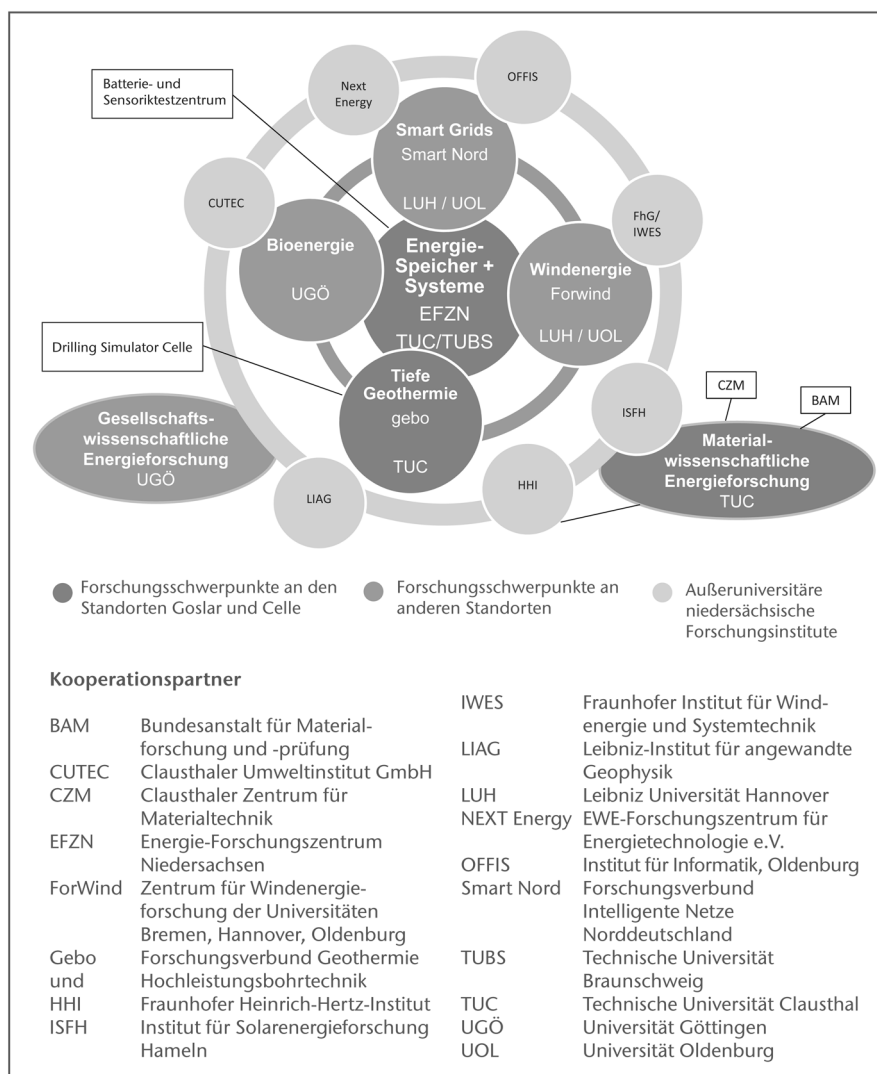


Abbildung 2.

Beitrag zur Stabilität und Sicherheit der zukünftigen Stromversorgung zu leisten. Zur Durchführung dieser Studie ist am EFZN ein disziplinübergreifendes Projektteam entsprechend Abbildung 3 gebildet worden.

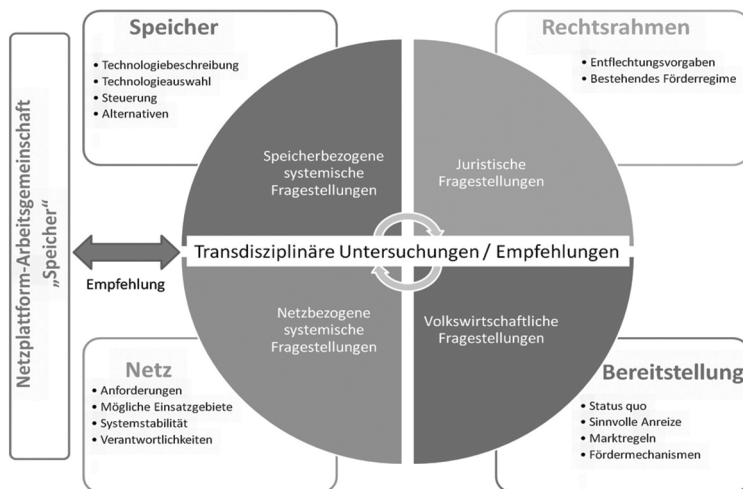


Abbildung 3.

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung wurde zunächst der Begriff der Systemsicherheit entsprechend Abbildung 4 in die Begriffswelt der Energiewirtschaft eingeordnet. Dabei wird die Systemsicherheit als Bewahrung eines stabilen und zulässigen Systemzustands definiert. Im Speziellen ist gemeint, dass Störeinflüsse auf das System sicher beherrscht werden können und ein sicheres Zusammenspiel der Systembereiche Erzeugung, Handel und Netzbetrieb gewährleistet wird. Bisher existiert keine Messgröße, die direkt den Grad der Systemsicherheit angibt. Hier könnte zum Beispiel die Schaffung eines allgemein anerkannten Index zukünftig sinnvoll sein.

### 3.1.1. Technischer Untersuchungen und ausgewählte Ergebnisse

Die Studie zeigt zum Einen mögliche, die Systemsicherheit beeinflussende Einsatzfelder für Speichertechnologien auf. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Präqualifikationsanforderungen für Speicher zur Erbringung von Systemdienstleistungen gelegt und wichtige Eckdaten determiniert. Dies sind bspw. die Höhe der minimal einzuspeisenden Wirkleistung, die minimal zu realisierende Erbringungsdauer und der Leistungsgradient. Außerdem wurden mögliche Hemmnisse für einen Speichereinsatz zur Erbringung von Systemdienstleistungen aufgezeigt. Dabei sind vor allem bei der Primärregelleistung die Erbringungsdauer und bei der Sekundärregelleistung die Höhe der Einspeiseleistung möglicherweise kritisch zu bewerten. Diesen Hemmnissen kann bspw.

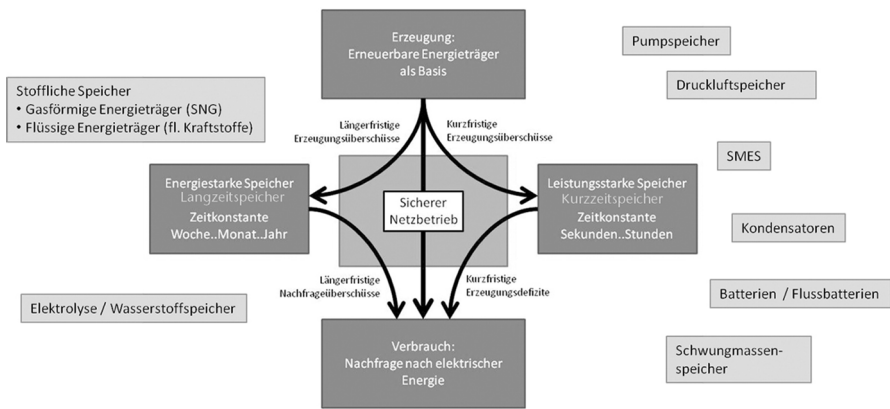


Abbildung 4.

durch das „Anlagenpooling“ von Speichern und der Möglichkeit zur Besicherung der ausgeschriebenen Regelleitungen durch Anlagen Dritter begegnet werden. Eine Kenngröße für den zukünftig ggf. notwendigen Speichereinsatz ist die zu erwartende Überschussenergiemenge, die sich aus der Einspeisung von erneuerbaren Energiequellen und sicherheitsrelevanten „Must-Run-Einheiten“ ergibt. Hinsichtlich des zukünftigen Regelenergiebedarfs kann festgehalten werden, dass dieser bei einem weiteren Erneuerbare Energien-Ausbau voraussichtlich ansteigen wird, allerdings ist hier nicht mit einem proportionalen Wachstum zu rechnen. Welche Technologien/Optionen zu welchem Zeitpunkt welche Beiträge zur Lösung dieser Herausforderung erbringen können, ließ sich im Rahmen dieser Studie nicht ableiten und hängt auch von dem Einsatz alternativer Flexibilitätsoptionen wie dem Netzausbau ab.

Zum Anderen wurde parallel zur Untersuchung der Einsatzgebiete auf die derzeit bekannten Technologien zur Speicherung elektrischer Energie eingegangen. Hierbei wurden die charakteristischen Eigenschaften mechanischer, elektrischer, elektrochemischer und auch stofflicher Speicher hinsichtlich der möglichen Speicherkapazitäten, ihrer Leistungsbereiche und -gradienten aufgezeigt.

Elektrische (DSK, SMES) und elektrochemische Speicher besitzen bisher nicht das Potential für einen marktfähigen Betrieb. Weiterentwicklungen insbesondere der Lithium-Batterietechnik, der Redox-Flow-Batterien sowie der Metall-Luft-Batterien lassen auf große Speichersysteme (>1 GWh) bei Kosten bezogen auf den Energieinhalt vergleichbar zu Pumpspeicherwerken hoffen. Pumpspeicherwerke lassen sich unter gewissen Rahmenbedingungen wirtschaftlich betreiben, jedoch



Quelle: EFZN / M. Schmidt, S. Hißbach, Beyer

Abbildung 5.

ist nur noch geringes Ausbaupotential vorhanden. Die bisher einzigen großen industriell genutzten Druckluftspeicherkraftwerke werden in McIntosh sowie in Huntorf betrieben. Sie besitzen jedoch einen relativ schlechten Wirkungsgrad von etwa 50%. Adiabate Speicher oder Speicher mit zusätzlichem Wärmespeicher zur Erhöhung des Wirkungsgrades auf 70% befinden sich noch im Forschungsstadium. Die stoffliche Speicherung lässt die notwendigen Potentiale zur Speicherung großer Energiemengen erwarten, die in zukünftigen Energiesystemen für den saisonalen Ausgleich an Bedeutung gewinnen werden. Derzeit befinden sich aber sowohl die großtechnische Elektrolyse als auch die Wasserstoffspeicherung in Kavernen oder in Druckspeichern noch im Forschungsstadium. Die Speicherung im Erdgasnetz, welche ein großes Potential besitzt, ist technisch mit großen Herausforderungen verbunden.

Zur Einordnung der Speichertechnologien in das gesamte Energiesystem werden auch andere Flexibilisierungsoptionen wie die Steuerung der Nachfrage nach elektrischer Energie (Demand-Side-Management) zur Verringerung des Speicherbedarfs, das Erzeugungsmanagement oder der flexible Betrieb konventioneller Kraftwerke vorgestellt. Der Energieimport und -export bieten eine weitere Option zum Ausgleich fluktuierender Differenzen von Stromangebot und -nachfrage.

Die oben genannten Speichertechnologien befinden sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt teilweise noch im Entwicklungsstadium. Deren Einsatz im Elektroenergiesystem ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig, wie z.B. der Geschwindigkeit des Netzausbaus oder des weiteren Zubaus der erneuerbaren Energien. Auf der Basis des derzeitigen Wissens können daher keine objektiven und belastbaren

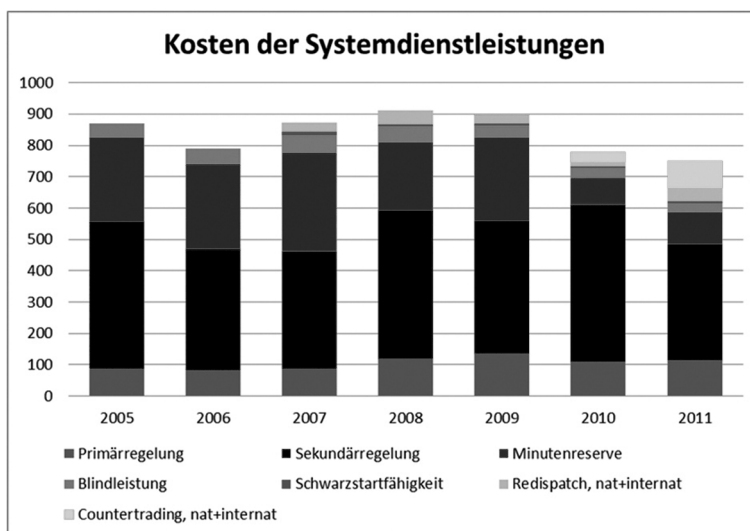


Abbildung 6.

Aussagen darüber getroffen werden, welche Speichertechnologien zu welchem Zeitpunkt erforderlich werden. Wird z.B. eine starke Flexibilisierung des konventionellen Kraftwerkspark als Übergangstechnologie vorgenommen, lässt sich die Notwendigkeit eines Speichereinsatzes zeitlich nach hinten verschieben. Einen ähnlichen Effekt würde ein verstärkter Einsatz des Demand-Side- und Erzeugungsmanagements bewirken.

Im weiteren Projektverlauf wurden die Ergebnisse beider Untersuchungen verschnitten und somit eine Zuordnung von Speichertechnologien und Einsatzgebieten vorgenommen und einer Bewertung unterzogen. Als wesentliche Aussagen der technischen Analysen lassen sich zusammenfassen, dass Batteriespeicher in naher Zukunft erfolgreich am Primärregelenergiemarkt tätig werden können. Ebenfalls können Batteriespeicher einen Beitrag zur Schwarzstartfähigkeit von Kraftwerken und zur Spannungshaltung in der Nieder- und Mittelspannungsebene leisten. Sehr schnelle Speicher, wie vor allem Schwungmassenspeicher können durch Erbringung der Momentanreserve die Netzsicherheit und Systemstabilität erhöhen. Alle diese Speicher müssen jedoch innerhalb eines Anlagenpools am Regelleistungsmarkt agieren. Weitere Flexibilisierungsmaßnahmen wie Demand-Side- und Erzeugungsmanagements erfüllen die vorgelegten Bewertungskriterien zur Erbringung von Systemdienstleistungen aus Sicht der Netz- und Systemsicherheit nicht hinreichend. Deren Einsatz zur Teilnahme am Regelleistungsmarkt ist daher Speichertechnologien unter bestimmten Bedingungen unterzuordnen.

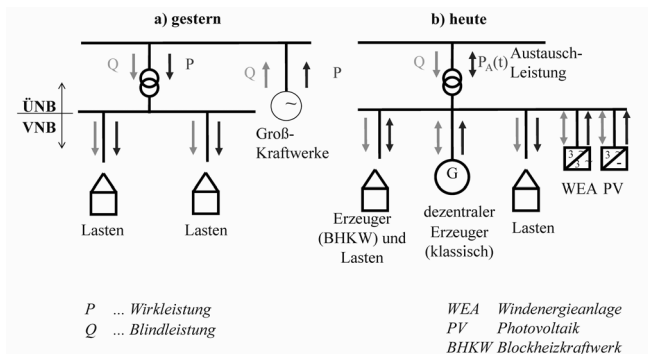


Abbildung 7.

Neben den Systemdienstleistungen stellt auch die Beseitigung von Netzengpässen eine sicherheitsrelevante Komponente dar.

Generell können zentrale und dezentrale Speicher durch ein intelligentes Verhalten einen positiven Beitrag für das Übertragungs- und das Verteilnetz leisten (netzdienlicher Speicherbetrieb). Hierunter fallen lokale Effekte wie die aktive Spannungsstützung durch lokale Blindleistungsbereitstellung, die Reduktion bzw. die Verzögerung von Netzausbaumaßnahmen sowie die Reduktion von Verlusten. Des Weiteren können Speicher im Anlagenverbund Regelleistung bereitstellen oder durch die Reduktion der lastseitigen Abendspitze die Notwendigkeit konventioneller Spitzenlastkraftwerke verringern und somit für das Energiesystem global systemstabilisierend wirken.

### 3.1.2. Rechtlicher Untersuchungsgegenstand und ausgewählte Ergebnisse

Hinsichtlich der Fragestellung nach einer sinnvollen und zulässigen Wahl eines Speicherbetreibers ist aus technischer Sicht kein Modell zu präferieren. Aus dem ebenfalls durchgeführten rechtlichen Untersuchungsgang ergibt sich, dass im Hinblick auf die Vorgaben zur Entflechtung von Stromspeicheranlagen verschiedene Konstellationen differenziert zu betrachten sind. Geboten ist eine Differenzierung

- nach dem Zweck der Speichernutzung (für Netzbetrieb, Erzeugung, Handel/Vertrieb oder eigenständig),
- nach dem Blickwinkel der Entflechtungsprüfung (Entflechtung des Netzes oder Entflechtung des Stromspeichers)

– sowie nach den unterschiedlichen Entflechtungsarten (informativ, buchhalterisch, rechtlich, operationell, eigentumsmäßig).

Zur Bestimmung der im konkreten Fall geltenden Entflechtungsvorgaben ist vor allem danach zu unterscheiden, welcher Zweck mit dem Betrieb des Stromspeichers verfolgt wird. Bislang noch offen sind die hierfür relevanten Fragen, ob die Stromspeicherung auch als Erzeugung eingeordnet werden kann und wie der Betrieb von sog. Power- to-Gas-to-Power-Anlagen zu behandeln ist.

### 3.1.3. Ökonomische Analysen und ausgewählte Ergebnisse

Die weiterhin durchgeführten ökonomischen Untersuchungen zeigen, dass die Investitionskosten von Speichern nur schwer abzuschätzen sind, da viele Technologien bislang nur im Labormaßstab existieren. Die Gesamtkosten variieren stark mit der technischen Auslegung und der Betriebsweise. Diese umfasst jedoch ein breites Spektrum unterschiedlicher Einsatzgebiete und wechselnder Strategien. So kann bspw. die Teilnahme an Regelenergiemärkten für einen alleinstehenden Speicher andere Fahrweisen erfordern als der Betrieb im Pool mit Kraftwerken. Ohne umfangreiche Marktsimulationen sind derzeit erste fundierte Angaben zu den Betriebskosten von Speichern nicht möglich. Die Bestimmung einer günstigsten Technologie wird zudem dadurch erschwert, dass es keine Technologie gibt, die alle abzudeckenden Einsatzbereiche erschließen kann. Eine ausführliche Beschreibung der derzeitigen Ausgaben für den Erhalt der Systemsicherheit ist vorgenommen worden.

Zum Abschluss wird die Bereitstellungslogik der Systemsicherheit untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die bestehenden Regelungen zum Erhalt der Systemsicherheit grundsätzlich funktionieren. Jedoch wurden zahlreiche Problemfelder identifiziert, welche die marktgeführte Bereitstellung von Systemdienstleistungen beeinträchtigen und den Bedarf an Sicherungsinstrumenten durch zusätzliche Netzbelastungen unnötig erhöhen. Ein schwerwiegendes Problem ist das Marktversagen im Bereich der europaweiten Bereitstellung von Systemdienstleistungen. Die fehlende Koordination der nationalen Versorgungsstrategien eröffnet Spielräume zur Externalisierung von Kosten. Allein aus diesem Motiv heraus lässt sich die ökonomische Notwendigkeit staatlichen Handelns zur Überarbeitung der geltenden Marktregeln rechtfertigen. In der bestehenden Marktstruktur ist ohne eine derartige Marktordnungspolitik kaum damit zu rechnen, dass Betreiber und Technologien, die durch eine hohe Kapitalintensität und hohe irreversible Kosten geprägt sind, am Markt eine Chance haben. Da die zukünftige technologische Entwicklung in allen für die Systemsicherheit relevanten Bereichen nur bedingt prognostizierbar ist, gleichzeitig aber die objektive Notwendigkeit von Maßnahmen zur Sicherung der Versorgungssicherheit auf Grund der Herausforderungen der Energiewende zunimmt, könnte hieraus eine Art Portfolioansatz konstruiert



werden. Hierdurch wird zumindest die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass in den verschiedenen Segmenten der Speichertechnologien eine Entwicklung in Richtung potenzieller Marktreife erfolgt.

Die im weiteren Verlauf durchgeführte Analyse zeigt einzelne Optionen für eine Förderung des Ausbaus von Energiespeichern und weiteren systemstabilisierenden Technologien auf und nimmt eine kurze ordnungspolitische Vergleichsanalyse vor. Gleichzeitig werden die bestehenden Förderinstrumente für Stromspeicher vorgestellt. Bei den wesentlichen Instrumenten, die der Förderung von Stromspeichern dienen, handelt es sich um:

- Netzentgeltbefreiungen,
- Befreiungen von der EEG-Umlage,
- Stromsteuerbefreiungen.

Ohne abschließende Empfehlungen für ein oder mehrere ordnungspolitisch optimale Förderinstrumente geben zu wollen, können dennoch folgende Kernaussagen zur möglichen Gestaltung des Förderrahmens zusammengefasst werden:

- Forschungsförderung bleibt langfristig notwendig.
- Ausnahmetatbestände (z. B. Befreiung von Netznutzungsgebühren) für einzelne Branchen oder konkurrierende Maßnahmen sollten vermieden werden.
- Leicht vermeidbare Investitionshemmnisse wie z.B. Entschädigungsregelungen nach § 12 EEG sind zu identifizieren und zu beseitigen.
- Der Zubau muss sich technologieoffen an der Fähigkeit der Technologien zur Erbringungen der benötigten systemstabilisierenden Leistungen orientieren, um technologische Fehlentwicklungen („lock-ins“) vermeiden zu können. Auf die Einführung neuer Umlagen auf Netz- bzw. Stromkunden sollte verzichtet werden.
- Zusätzliche Förderinstrumente sollten erst als letzte Option in Erwägung gezogen werden.

Weitergehende Informationen können auf den Seiten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologien abgerufen werden. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Studie im Rahmen der EFZN-Schriftenreihe (Band 13) veröffentlicht worden<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Arbeitsgruppe Energiespeicher des EFZN: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Bd. 13. Goslar 2013.

## 3.2. Stromautobahnen für das Verbundnetz

Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung hat sich zwischen den Jahren 2000 bis 2011 von 6% auf 20,1% mehr als verdreifacht<sup>6</sup>. Das ehrgeizige Ziel der Bundesregierung, diesen Anteil bis zum Jahr 2050 auf 80% zu steigern<sup>2</sup>, würde eine weitere starke Zunahme dieser Erzeugerleistungen bedeuten. Die sich dabei ergebenden Veränderungen des Energieversorgungssystems führen insgesamt zu einer Umstrukturierung der Versorgungsaufgabe: weg von den verbrauchsnahe zentralen Großkraftwerken (Bild 7a), die in Übertragungsnetze einspeisen, hin zu einem zunehmend dezentralisierten Versorgungssystem mit verbrauchsferneren Erzeugungsanlagen, die sowohl Wirkleistung P als auch Blindleistung Q bereitstellen werden (Bild 7b). Dies hat zur Folge, dass dezentrale Stromeinspeisungen der dargebotsabhängigen Anlagen vermehrt die regionale Nachfrage übersteigen und diese im günstigsten Fall mit den ausgebauten Übertragungsnetzen zu anderen Regionen mit ungedecktem Bedarf transportiert werden müssen. Dies hätte einen erheblichen Ausbau des heutigen Drehstromverbundnetzes zur Folge<sup>7</sup>.

Es stellt sich deshalb die Frage, inwieweit ein Ausbau des Drehstromverbundnetzes dem Neubau eines Gleichstromtransportnetzes vorzuziehen ist. In dieser Hinsicht bietet die vorliegende regionalisierte Untersuchung der künftigen Erzeugungssituation einen Ansatz, um einerseits notwendige Transportkapazitäten und andererseits regionale Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen zur Reduzierung des Netzausbaus bzw. -neubaus zu identifizieren.

### 3.2.1. Methodik zur Untersuchung der Energieregionen

Für eine regionalisierte Untersuchung wird als Ausgangspunkt eine Charakterisierung der großflächigen Verteilnetze anhand netzrelevanter Daten, Strukturmerkmale und installierter erneuerbarer Energieanlagen durchgeführt<sup>8</sup>. Die jeweils installierten Erzeugungsleistungen werden ermittelt und anschließend gemäß Netzentwicklungsplan (Leitszenario B) der Bundesnetzagentur auf das Jahr 2032 hochskaliert. Auf Basis der erhobenen Daten ergeben sich dann anhand einer Verhältnisbildung zwischen den installierten Windenergie- und Photovoltaikleistungen zu Transformatorleistungen und Jahreshöchstlast die folgenden

---

<sup>6</sup> Agentur für Erneuerbare Energien. [www.unendlich-viel-energie.de](http://www.unendlich-viel-energie.de) (2011).

<sup>7</sup> Deutsche Energieagentur GmbH: Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025. Berlin 2010.

<sup>8</sup> Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen. Stand: 2010.

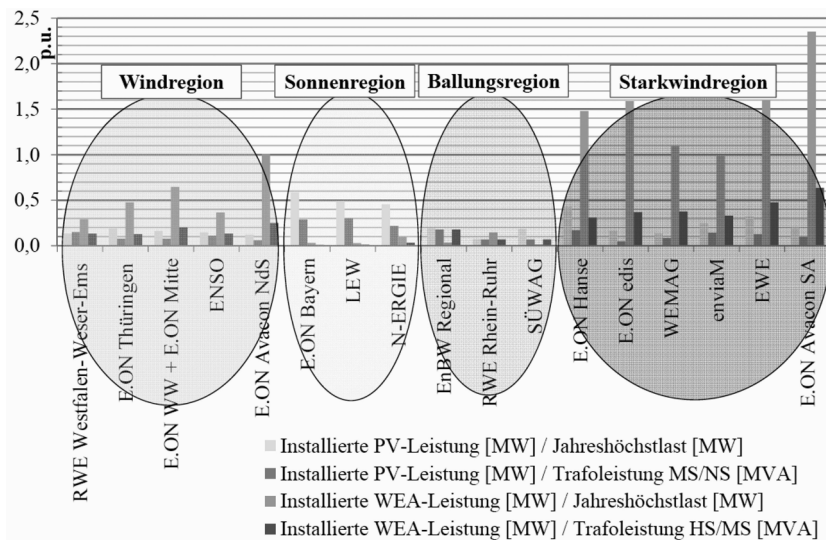


Abbildung 8.

kategorisierten Regionen: Starkwind, Wind, Sonne und Ballung (Bild 8). Diese Regionen werden der weiteren Untersuchung zugrunde gelegt.

Die Erzeugungslastgänge der Windenergie- und PV-Anlagen werden auf das Jahr 2011 normiert, dem jeweiligen Netzbetreiber zugeordnet und auf das Jahr 2032 hochskaliert. Die Energieerzeugung aus Biomasse, Biogas, Laufwasser und Geothermie wird konstant mit einer jährlichen Betriebsdauer von rd. 6000 h angenommen. Unter der weiteren Annahme einer bis 2032 gleichbleibenden Verbrauchslast werden die Austauschleistungen  $P_A(t)$  zwischen Verteilungs- und Übertragungsnetz berechnet. Auf Basis dieser Ergebnisse ergeben sich die Zeitreihen und Dauerlinien der Austauschleistungen der Energieregionen, aus denen die Folgerungen für einen in jedem Fall notwendigen Übertragungsnetzausbau abgeleitet werden können (Bild 9).

### 3.2.2. Nutzbarmachung von Überschussstrom am Beispiel der Starkwindregion

Um die naturbedingt schwankende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in das Versorgungsnetz zu integrieren, stehen grundsätzlich folgende Maßnahmen zur Verfügung:

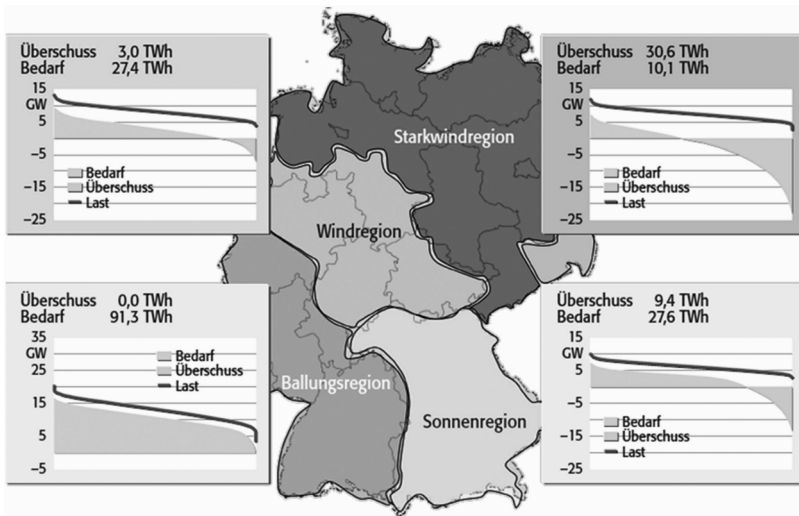


Abbildung 9.

## Spitzenbeseitigung

- Energiemanagement/Demand- Side-Control
- Produktionsmanagement (z. B. Regelenergiebereitstellung aus Bioenergie)

## Regionale Speicherung

- Leistungsspeicher (Kurzzeitspeicher, z. B. durch Pumpspeicherwerke (Über- oder Untertage<sup>9</sup>) zur Glättung von Last- und Erzeugerspitzen,
- Energiespeicher (z. B. Wasserstoffspeicher) für den saisonalen Ausgleich (Tage, Wochen usw.)

## Netzausbau/-neubau

- Ausbau von Drehstromverbund-/Verteilungsnetzen,
- Neubau eines Gleichstromtransportnetzes (Overlay-Netz)

<sup>9</sup> Wehrmann, E.-A., A. Mbuy & S. Nakhaie: Energiesystemtechnische Aspekte. In: H.-P. Beck, M. Schmidt (Hrsg.): Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Goslar 2011.

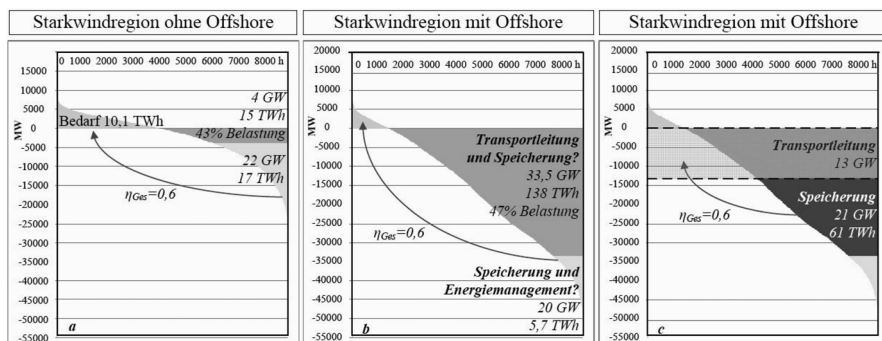


Abbildung 10.

Bei der Modellierung der identifizierten Verteilungsnetzbetreiber und Energieregionen sind zwei Gesichtspunkte von besonderem Interesse. Einerseits kann aus der Betrachtung der Zeitreihen der Austauschleistungen die Höhe der auftretenden Rückspeisespitzen und deren Häufigkeit und Dauer gewonnen werden. Andererseits dient die Betrachtung der Dauerlinie der Ermittlung von Überschuss- und Bedarfsstunden sowie zum Vorschlag von Maßnahmen zur Nutzbarmachung des Überschusses und der Bedarfsdeckung.

Als Beispiel werden die Ergebnisse für die Starkwindregion in 2032 vorgestellt. Dabei ergibt sich, dass eine Rückspeisespitze von 26 GW und eine Überschussenergie von 30,6 TWh zu erwarten sind. Anstatt die gesamte Überschussenergie in das vorgelagerte Netz zu übertragen und damit eventuell Netzengpässe zu verursachen, bietet sich die Möglichkeit, mit regionaler Speicherung den Teil der Überschussenergie zwischenzuspeichern, der in der Region ohnehin gebraucht wird. Durch diese Maßnahme könnte ein massiver Netzausbau verhindert werden. Um dies genauer zu spezifizieren, wird die folgende Beispielrechnung angeführt.

Um den restlichen Eigenbedarf in der Starkwindregion decken zu können, ist bei einem Gesamtspeicherwirkungsgrad von 60% eine Speicherkapazität von 17 TWh erforderlich (Bild 10a). Die übrig bleibende Energie in Höhe von 15 TWh müsste dann mit einer Transportleistung von 4 GW abtransportiert werden. Der Belastungsgrad der Transportleitung läge dann bei 43%, was in etwa dem heute üblichen Wert (47%<sup>10</sup>) entspricht.

<sup>10</sup> Oswald, B.R. & L. Hofmann: Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Übertragungstechniken im Höchstspannungsnetz anhand der 380-kV-Leitung Wahle-Mecklar. Hannover 2010.

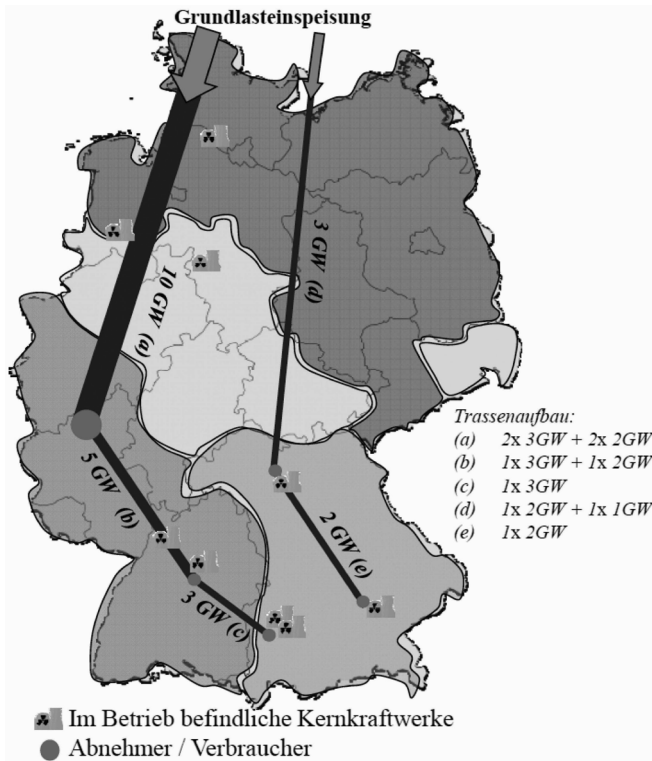


Abbildung 11.

Die Überschussenergie der Starkwindregion wird allerdings erheblich größer, wenn die in der Nord- und Ostsee zu erwartenden Offshore-Windenergieanlagen hinzukommen. Bei rein energetischer Betrachtung der Region ergibt sich eine neue Dauerlinie (Bild 10b), die diesen erheblichen Überschuss ausweist. Beim gleichen Ansatz zum regionalen Energiebedarf wie vorher wären statt 4 GW eine Transportleistung von 33,5 GW notwendig. Nach Hofmann<sup>11</sup> ergeben sich daraus rd. 11 HGÜ- Trassen mit je 3 GW Leistung. Der Belastungsgrad beträgt 47% und die erforderliche Trasse hat mindestens eine Breite von 110 m. Um diese relativ große Transportleistung zu reduzieren und gleichzeitig die Auslastung der

<sup>11</sup> Hofmann, L.: Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen. Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie, Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Bd. 4.3. Goslar 2012.

Transportleitungen auf 8 760 h zu erhöhen, müssten 61 TWh regional zwischengespeichert werden. In diesem Fall würde die Transportleitung eine Leistung von nur 13 GW benötigen und eine grundlastähnliche Energielieferung am Ende der Leitung ermöglichen (Bild 10c). Auf diese Weise könnte beispielsweise die Gesamtleistung der heute noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke (KKW) von rund 13,7 GW<sup>12</sup> ersetzt werden. Allerdings müssten dann Transportleitungen neu gebaut werden, die die vorhandenen Entfernungen zwischen der Starkwindregion und den Einspeisepunkten der KKW im heutigen Verbundnetz überbrücken. Bild 11 zeigt eine Darstellung, die diesen Gedanken aufgreift. Es wird deutlich, dass zwei von Norden nach Süden verlaufende Transportleitungen notwendig werden, um die Starkwindregion mit den heutigen KKW-Erzeugerschwerpunkten im Süden zu verbinden.

Darüber hinaus besteht gegebenenfalls die Möglichkeit zur Abregelung von Leistungsspitzen, die lediglich in sehr wenigen Stunden des Jahres vorkommen und somit einen verhältnismäßig geringen Energieinhalt aufweisen und einen Abtransport über zusätzliche Übertragungskapazitäten unwirtschaftlich erscheinen lassen. Die zuvor aufgeführten Berechnungen enthalten diese Abregelung nicht, wodurch eine Spitzenleistung von 6 GW mit 300 GWh entsteht (0,4% des Stromverbrauchs der betrachteten Netzbetreiber in der Starkwindregion). Inwieweit eine Abregelung sinnvoll ist oder eher eine Nutzbarmachung von Spitzenleistungen vor Ort erfolgen kann, z.B. durch Installation von Elektrowärmepumpen und Nutzung von Elektroautos, bleibt abzuwarten.

### 3.2.3. Ausblick

In der vorliegenden, auf Regionen und Spannungsebenen (ÜNB/VNB) bezogenen Untersuchung auf der Basis des Leitszenarios<sup>13</sup>, werden die Austauschleistungen  $P_A(t)$  im Jahr 2032 berechnet. Die Berechnungen ergeben teilweise erhebliche Rückspeisespitzen in das Übertragungsnetz, die im Fall der Mitberücksichtigung der Offshore-Windenergieanlagen in der Starkwindregion bei rd. 26 GW liegen.

Um die Stabilität des bestehenden Verbundnetzes aufgrund enormer Rückspeisespitzen nicht zu gefährden, bietet sich die Möglichkeit zur Bündelung und direktem Abtransport dieser Überschussenergie über ein leistungsfähiges Gleichstromtransportnetz (Overlay-Netz) zu den heutigen KKW-Standorten an. Damit die entsprechende Grundlast geliefert werden kann und die Gleichstrom-

---

<sup>12</sup> Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_Konventioneller-Kraftwerkspark](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Konventioneller-Kraftwerkspark) (2013).

<sup>13</sup> Bundesnetzagentur. [www.bundesnetzagentur.de](http://www.bundesnetzagentur.de) (2011).



transportleistungen einen hohen Belastungsgrad (hier 100%) aufweisen, ist eine regionale Speicherung zum Spitzenlastausgleich unabdingbar. Durch eine solche Zwischenspeicherung vor Ort ergibt sich ein minimierter Leitungsaus- bzw. -neubau mit einer Transportkapazität von nur noch 13 GW. Im Vergleich dazu liegt die Gesamtnettoleistung der noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in Deutschland bei rd. 13,7 GW<sup>12</sup>.

Um dieses vorliegende Ergebnis weiter zu untermauern, ist es notwendig, die technischen und wirtschaftlichen Parameter der angewandten Speichertechnologien, wie Pump- bzw. Druckluftspeicherwerk sowie das Produktionsmanagement für Bioenergieerzeugung, stromgeführte BHKW, Elektrowärmepumpe usw., in die Untersuchung einzubeziehen.

Darüber hinaus sind Kapazität und optimale räumliche Anordnung der Speicher anhand von Spektralanalysen der Austauschleistungen zu bestimmen. Ziel dabei wäre es auch, unter den Randbedingungen des vorgeschlagenen Overlay-Netzes den Ausbaubedarf im Drehstromverbundnetz für den notwendigen Wirk- und Blindleistungsfluss zu minimieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die Umrichterstationen des Gleichstromtransportnetzes an den Einspeisepunkten Blindleistung zur Verfügung stellen können, was ebenfalls zur Reduzierung beim Ausbau des Drehstromübertragungsnetzes führt.

### 3.3. e-home 2020

Das e-home Energieprojekt 2020 ist ein Verbundprojekt der Avacon AG (AVA) und des EFZN, bei dem zentrale Fragestellungen hinsichtlich des Aufbaus, der Planung und des Betriebs zukünftiger Niederspannungsnetzstrukturen untersucht werden. Es zielt darauf ab, bereits heute die sich aus der Energiewende ergebenden Entwicklungen im Netzplanungsprozess abzubilden und zukünftig relevante Netzstrukturen zu definieren. Dabei berücksichtigt das Projekt auch die technologischen Entwicklungen im Bereich der Netztechnik und untersucht mit unmittelbarem Praxisbezug den Einsatz neuer Technologien zur Spannungshaltung als auch von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). Im Rahmen des e-home-Projektes finden dabei der regelbare Ortsnetztransformator (rONT) und Breitband-Powerline Anwendung.

Zu diesem Zweck hat AVA in zwei ausgewählten Niederspannungsnetzen insgesamt 32 Haushalte bei der Anschaffung je einer Photovoltaik- und Klimaanlage sowie eines Elektroautos unterstützt. Des Weiteren sind in den ausgewählten Forschungsnetzen der Gemeinden Stuhr und Weyhe komplexe Messinfrastrukturen („Smart Meter“, „PowerQuality“-Messgeräte, „Powerline-Communication“, Datenserver, Datenportal) sowie Prototypen regelbarer Ortsnetztransformatoren installiert worden. Im Ergebnis können die Auswirkungen des veränderten Ein-

speise- und Verbraucherverhaltens auf die Ortsnetze unter realen Bedingungen gemessen und ausgewertet werden.

Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts übernimmt das EFZN im Sinne einer Begleitforschung. Sowohl technische als auch wirtschaftliche, juristische und sozialwissenschaftliche Aspekte werden im Rahmen des e-home-Projekts untersucht. Durch die Nutzung und den Ausbau zwei realer Forschungsnetze zeichnet sich das e-home-Projekt durch einen hohen Praxisbezug aus. Dieser ermöglicht eine Validierung der theoretisch erarbeiteten Ergebnisse mit den gewonnenen Messwerten. So ist es inzwischen in Kooperation mit der Maschinenfabrik Reinhausen gelungen, den rONT zur Serienreife zu bringen.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes arbeiten im technischen Bereich das Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia) der TU Braunschweig, das Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) der TU Clausthal sowie das Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEH) der Leibniz Universität Hannover zusammen. Im geisteswissenschaftlichen Bereich beteiligen sich das Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (IBER) der TU Clausthal, die Professur für Produktion und Logistik (PPL) der Georg-August-Universität Göttingen sowie das Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB) der TU Braunschweig.

Im technischen Bereich wurde aktuell eine Überarbeitung der bisherigen Erkenntnisse zur Entwicklung der Netzaufgabe auf der Basis von Zeitreihen (Profilen) vorgenommen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Abkehr von 15 Minutenwerten hin zu einer einminütigen Auflösung der generierten Profile. Im Ergebnis wurden neue Algorithmen zur Erzeugung synthetischer Profile für die Komponenten Haushalt allgemein, Elektroauto, Wärmepumpe und Photovoltaikanlage (PV-Anlage) entwickelt. Hierfür sind die zentralen Einflussfaktoren ermittelt und berücksichtigt worden. Zur Nachbildung des Einspeiseverhaltens von PV-Anlagen sind dies exemplarisch die Ausrichtung (Himmelsrichtung), geogr. Lage, Aufstellwinkel, Wetter, Temperatur sowie der Modulwirkungsgrad. Ein Vergleich mit den real gemessenen Profilen wird aktuell durchgeführt.

Im Themengebiet rONT wurden verschiedene Regelalgorithmen untersucht und miteinander verglichen. Ziel ist es, die Wirkung auf das Niederspannungsnetz zu analysieren und die Spannungspreizung an der Niederspannungsverteilung durch den Einsatz von rONT zu minimieren, um in der Niederspannungsnetzplanung weitere Freiheiten zu erhalten. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass durch die Implementierung eines Reglers mit Zeitverhalten Stufvorgänge durch kurzzeitige Spannungsänderungen vermieden werden können. Bei diesen Reglern ist für die Berechnung der netzplanerischen Freiheiten hinsichtlich des Spannungshubes immer das Band der Schnellrückschaltung zu wählen, da hierdurch die Spannungsextrema an der Niederspannungsverteilung der Ortsnetzstation definiert werden.

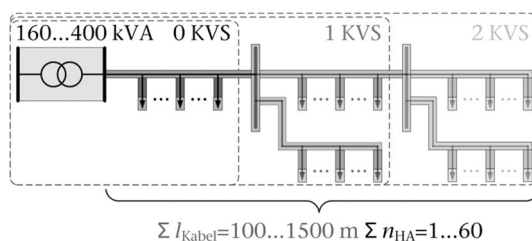


Abbildung 12.

Im weiteren Vorgehen wurde ebenfalls eine lastflussabhängige Sollwertvorgabe untersucht. Um den deutlichen Anstieg der Schaltspielhäufigkeit zu begrenzen, wird im weiteren Verlauf ein Dreipunktglied zur Sollwertvorgabe vorgesehen, um kurzzeitige Sollwertänderungen zu vermeiden bzw. die Flickerstärke zu vermindern.

Neben diesen Untersuchungen wurden auch die Wechselwirkungen mit weiteren Regelkreisen untersucht. Im Speziellen wird der zeitgleiche Einsatz einer Q(U)-Regelung der PV-Anlagen und eines rONT analysiert. In einem Modell aus fünf PV-Anlagen an einer vereinfachten Niederspannungsnetzstruktur wird das Zusammenspiel der Regler getestet. Bisher konnte keine negative Beeinflussung festgestellt werden, wobei diese Aussage jedoch noch nicht abschließend getroffen werden kann.

Im Rahmen des e-home-Projektes werden, um eine Verallgemeinerung der Aussagen vornehmen zu können, neben den realen e-home-Netzen synthetische Netzstrukturen verwendet. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der diese aus hinterlegten technischen Parametern modelliert, automatisiert Netzberechnungen auf der Basis geeigneter Lastannahmen und gegebenenfalls Netzausbaumaßnahmen durchführt sowie die Ergebnisse für die spätere Auswertung archiviert. Die Berechnungen gliedern sich nach den implementierten Szenarien Photovoltaik (Erzeugungsszenario), Wärmepumpe und Elektrofahrzeug (Lastszenarien), jeweils mit fünf unterschiedlichen Durchdringungen der entsprechenden technischen Komponenten. Neben der Abstimmung dieser Szenarien sind ferner die technischen Parameter und ihre jeweiligen Variationsbreiten an die real anzutreffenden Niederspannungsnetze der AVA angepasst worden. Der prinzipielle Aufbau der synthetischen Netzstrukturen ist Abbildung 3 zu entnehmen.

Da es sich hierbei um eine strangweise Betrachtung handelt, sind die übrigen Niederspannungsabgänge über entsprechende Ersatzlasten an der Transformatorsammelschiene abgebildet worden. Zur Bildung der Ersatzlasten wird als Eingangsparameter die spezifische Transformatorleistung je Hausanschluss



Abbildung 13.

herangezogen und ebenfalls in mehreren Schritten variiert. Durch diese Vorgehensweise ist weiterhin eine Rekombination der untersuchten Stränge zu umfänglichen Ortsnetzen möglich.

Werden vorgegebene Grenzwerte überschritten, muss das Netz ausgebaut werden. Dazu sind zwei Ansätze möglich:

Methode 1 – klassische Netzverstärkung (wenn die Lastflussberechnung thermische Betriebsmittelüberlastungen feststellt, wird ein leistungsstärkerer Ortsnetztransformator verbaut und/oder der Leiterquerschnitt vergrößert, beziehungsweise ein Parallelkabel gelegt),

Methode 2 – regelbarer Ortsnetztransformator und Netzverstärkung (wenn die Notwendigkeit besteht, wird ein rONT verbaut beziehungsweise werden analog zur Methode 1 die Leitungen zusätzlich verstärkt).

Um einen effizienten und zukunftsweisenden Netzausbau sicherzustellen beziehungsweise den notwendigen Kapitaleinsatz entsprechend zu gestalten, müssen die technisch umsetzbaren Konzepte bewertet werden. Anhand ökologischer, ökonomischer, technischer und sozialer Kriterien wird das Einsatzpotential des rONT gegenüber einem konventionellen Netzausbau bestimmt. In den letzten Monaten sind dabei in einem intensiven Austausch zwischen den Projektpartnern die Bewertungskriterien sowie deren Gewichtung festgelegt worden.

Die Bewertung der beiden Netzausbauvarianten erfolgt über das Outranking-Verfahren PROMETHEE, bei dem für jede synthetische Netzstruktur eine Rangordnung der beiden Netzausbauvarianten (konventionell beziehungsweise mit rONT) durch paarweise Vergleiche der Alternativen für jedes Bewertungskriterium erstellt wird. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann dem Netzbetreiber eine Empfehlung gegeben werden, welche Netzausbauvariante unter Berücksichtigung der ökologischen, ökonomischen, technischen und sozialen Bewertungskriterien zu bevorzugen ist.

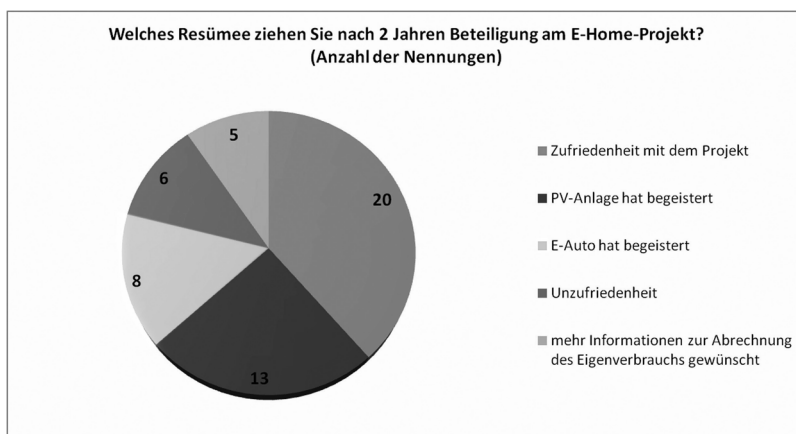


Abbildung 14.

Die juristische Begleitforschung untersuchte in den zurückliegenden Monaten unter anderem die Anerkennung bestimmter Kostenpositionen, wie die Kosten für „Smart Metering“ und rONT, in der Anreizregulierung. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Kosten für einen rONT höher sind als die eines konventionellen Transformators. Sie sind ein Teil der Netzkosten und unterliegen als beeinflussbare Kosten dem Effizienzvergleich. Dort wirken sie sich kurzfristig negativ, langfristig jedoch positiv auf die Erlösobergrenze des Netzbetreibers aus, sofern sie zukünftig Netzausbaukosten einsparen. Nach dem Grundsatz der Anreizregulierung werden die Kosten für rONT mit mehrjährigem Zeitversatz erstmals in den Netzentgelten berücksichtigt. Durch die Länge der Regulierungsperioden kann ein Zeitversatz von bis zu sieben Jahren entstehen. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Möglichkeiten wie zum Beispiel die Anwendung des Erweiterungsfaktors zur Reduzierung dieses Zeitversatzes diskutiert und deren Anwendung unter Berücksichtigung der regulatorischen Restriktionen für möglich gehalten.

Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung wurde eine weitere Studie zur Akzeptanz und Zufriedenheit der am Projekt beteiligten Personen durchgeführt. 29 von 32 Teilnehmern waren zu einem Interview bereit, um Fragen zum Projekt zu beantworten. Die Mehrheit zieht ein positives Resümee aus den vergangenen zwei Projektjahren und zeigt (technisches) Interesse, besonders die PV-Anlage wird positiv bewertet. Jedoch wünschen sich die Teilnehmer mehr Informationen, zum Beispiel zur Bedienung der „Smart Meter“ oder technische Daten zur Klimaanlage. Durch das Projekt haben viele Teilnehmer ihr Verbrauchsverhalten in Richtung der Eigenverbrauchsoptimierung verändert. So werden

elektrische Geräte zur Nutzung der eigenerzeugten Energie gezielt dann in Betrieb genommen, wenn die Sonne scheint.

Das Projekt wurde im August 2013 um weitere drei Jahre verlängert. Als zusätzliches Element wird AVA den teilnehmenden Haushalten die Integration eines Batteriespeichers anbieten. Die sich hieraus ergebenden technischen, rechtlichen, ökonomischen und sozialwissenschaftlichen Fragestellungen werden zentraler Bestandteil der weiteren wissenschaftlichen Begleitforschung sein.

#### **4. Fazit**

Die dargestellten Forschungsbeispiele zeigen die Vielseitigkeit und problemorientierte Flexibilität der Struktur des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen auf. Der transdisziplinäre Gedanke ermöglicht es, spezifischen Problemen auf den Grund zu gehen und die gewonnen Erkenntnisse in die ganzheitliche Struktur der Energiewissenschaften einzuflechten. Nur so ist es möglich, diese gesamtgesellschaftlich gewinnbringend einzusetzen.

Die drei Forschungsbeispiele zeigten an verschiedenen Stellen auf, wie die Veränderung bzw. die Optimierung einzelner Parameter entscheidende Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben können. Sei es die Schaffung von wirtschaftlichen Anreizen zum Ausbau von Batteriespeichern, um Mittelfristig die Netzstabilität zu erhalten, der Ausbau von Stromautobahnen zur Erschließung weiterer regenerativer Energiequellen oder das sich veränderte Verhalten von Konsumenten durch die Bereitstellung eigener Energieversorgungsquellen. Diese sind nur jeweils ein Beispiel aus den vorgestellten Forschungsprojekten, die aber einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen der Energiewende sein können. Erschlossen wurden Sie durch eine transdisziplinäre Betrachtung des Themenfeldes.

Die Langfristigkeit der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe der Energiewende impliziert, dass solche Betrachtungen auch zukünftig von höchster Wichtigkeit sein werden. Das EFZN leistet einen dauerhaften Beitrag zur Entwicklung der transdisziplinären Forschung entlang der gesamten Energieprozess- und Energiewertschöpfungskette und ermöglicht dies.